

## 加熱促進養生したシリカフェームコンクリートの特性評価とその応用に関する研究

|        |   |
|--------|---|
| 著者     | 前田 直己   |
| 号      | 5   |
| 学位授与番号 | 31  |
| URL    | <a href="http://hdl.handle.net/10097/37982">http://hdl.handle.net/10097/37982</a> |

|               |   |              |  |
|---------------|---|--------------|--|
| 氏 名           | まえ た なお み<br>前 田 直 己                      |              |  |
| 授 与 学 位       | 博士（環境科学）                                  |              |  |
| 学 位 記 番 号     | 環博第31号                                    |              |  |
| 学 位 授 与 年 月 日 | 平成20年3月25日                                |              |  |
| 学位授与の根拠法規     | 学位規則第4条第1項                                |              |  |
| 研究科、専攻の名称     | 東北大学大学院環境科学研究科（博士課程）環境科学専攻                |              |  |
| 学 位 論 文 題 目   | 加熱促進養生したシリカフェームコンクリートの特性評価と<br>その応用に関する研究 |              |  |
| 指 導 教 員       | 東北大学教授 田路 和幸                              |              |  |
| 論 文 審 査 委 員   | 主査 東北大学教授 田路 和幸                           | 東北大学教授 石田 秀輝 |  |
|               | 東北大学教授 井奥 洪二                              | 東北大学教授 橋田 俊之 |  |

## 論 文 内 容 要 旨

本研究の対象とするセメントの歴史は古く 9000 年前に遡ることが出来、現在使用されているポルトランドも 1824 年にその原型を見ることができる。鉄筋コンクリートも 1867 年に発明された。当初は石材等の接着剤と使用され、次に人造石として、鉄筋コンクリートの発明によって、初めて構造部材として使用されてきた。適応するものは土木・建築の分野に限られてきたのが、セメント-コンクリートの歴史である。また、セメントは製鉄の副産物のスラグや石炭火力発電所から排出されるフライアッシュを多量に受け入れ、原材料として再活用している。

もう一つの対象であるシリカフェームも電気炉から発生する排煙に含まれる非晶質な珪酸塩の微粉末である。この微粉末のシリカフェームをセメントに混和することにより、従来は考えられなかった高強度コンクリートを造ることが可能となった。シリカフェームの研究は北欧諸国が一步リードした状況であり、我が国の大学関係者やコンクリート関連業界の土木・建築の材料研究者が世界的な研究に乗り遅れた意識を持ち、1989 年に、従来例を見ない土木と建築が一緒になり「日本シリカフェーム技術研究会」を設立し、既往の研究調査や新規の研究報告が行われ、欧米の研究と遜色のない技術水準に到達した。しかし、シリカフェームに関する研究で未解明な領域もあった。特に、蒸気やオートクレーブなどの加熱促進養生したシリカフェームコンクリートの特性は十分に把握されておらず、ポルトランドセメ

ントの高度利用の観点からも、系統的な検討が望まれていた。このような背景が、本研究を開始する事由である。プレキャスト製品を加熱促進養生し、シリカフュームコンクリートの諸特性について、系統的に実験的研究を行い、新しい知見を得ると共に、その高機能化を図り、シリカフュームコンクリートを従来の土木・建築分野だけではなく、機械産業、自動車産業などへの応用展開することを目的とした。

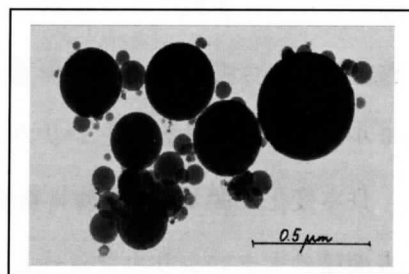
786

本論文は、「加熱促進養生したシリカフュームコンクリートの特性評価とその応用に関する研究」と題し、全6章から構成されている。1章では序論として本研究の目的と背景を、2章では基礎特性評価としてシリカフュームコンクリートの力学的性質、寸法変化及び耐久性、3章及び4章では特性の向上を3章では強度の改善、4章では硬化時及び硬化後の寸法安定性の改善、5章では応用として3章及び4章の改善の成果を得てプレキャスト製品に応用した事例を示し、6章で総括する。

第1章では、本研究の目的と背景並びに既往の研究を述べ、本研究の位置付けた。最初にシリカフュームとは図0.1.1に示すように

1 粒子の直径が $0.1\sim 0.5\mu$ の球形であり、セメントの粒子間の空隙を超微粒子のシリカフュームが充填する。

2 化学組成が非晶質の珪酸塩で、化学組成が $\text{SiO}_2$ が85～95%であり、ポゾラン反応性に優れ、ポルトランドセメントの水和反応より生成する水酸化カルシウムと反応して珪酸カルシウム水和物を生成する。

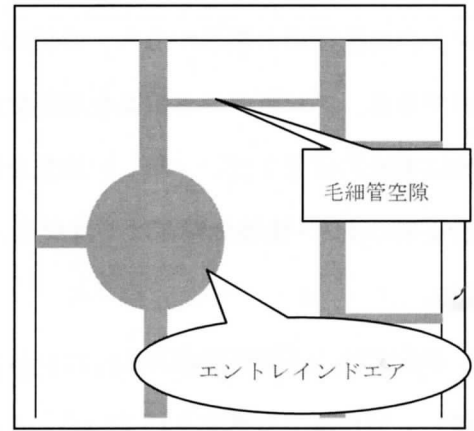


3 比表面積は $15\sim 25\text{m}^2/\text{g}$ であることは、保水性が高くブリージング骨材の分離等が減少する。よって、シリカフュームはコンクリートの高強度化に不可欠な材料と言われる。コンクリートの高強度化は、コンクリート構造物の部材断面の縮小、それに伴う軽量化が達成できる。さらに、硬化体組織の密実化や欠陥の減少にコンクリートの耐久性の向上が図れる観点から、高強度化することは大きな意義をもつと考える。

「コンクリートの強度を鉄並に、その価格を木材並に」この言葉は共に歩んできた父の夢であった。表面上緻密に見えるコンクリートでも、その中には多くの空隙がある。その空隙は混練りする際巻き込まれる気泡、水分が蒸発して残る気泡や表層部と内部と収縮差によって発生するひび等と考えられる。図0.1.2に示す。

空隙があることは、高強度コンクリートを考える。この空隙を充填することが強度の改善の第一歩と考え、充填材をポリマーを選択した。

無機材料であるシリカフュームコンクリート単独、あるいは有機材料と組み合わせによって特性を向上させ、石、鋳鉄、鋼に匹敵する強度を安価に製造し、ポルトランドセメントをそれらの代替材料として有効活用することは極めて意義深い、と考えた。



第2章では、シリカフュームを混和したコンクリートの特性、特に力学的性質、長さ変化、熱的性質及び耐久性について実験を行った。

力学的性質に関して、水セメント比とシリカフューム混和率の影響について実験を試み、その結果、材令と強度、養生法と圧縮強度、混和率と引張強度、混和率と曲げ強度、応力とひずみ関係、圧縮強度と静弾性係数の実験データを得た。強度に及ぼす雰囲気温度の影響について実験を試み、その結果、曲げ強度に及ぼす雰囲気温度の影響、雰囲気温度と相対強度の関係、表層モルタルの加熱前後の細孔分布、モルタルの全細孔容積とシリカフューム混和率の実験データを得た。

長さ変化に関しては、蒸気養生時の長さ変化（硬化収縮）と乾燥収縮について実験を試み、その結果、表面積の大きいシリカフュームを用いたコンクリートの初期長さ変化、初期長さ変化に及ぼすシリカフュームの種類の影響、蒸気養生したシリカフュームコンクリートの乾燥収縮、乾燥収縮に及ぼすシリカフュームの種類の影響及び乾燥材令 28 日の質量減少率等の実験データを得た。熱による寸法変化について実験を試み、その結果温度変化に伴うコンクリートのひずみの変化の実験データを得た。

耐久性については、水密性、耐塩害性、耐凍害性、耐磨耗性及び耐熱性について実験を試み、その結果、水密性では、透水時間と透水量の関係、透水 6 時間後の平均浸透深さの実験データを得た。シリカフュームコンクリートの透水係数を求めた。耐塩害性では、暴露材令と動弾性係数との関係、暴露材令と曲げ強度の関係、圧縮強度の関係、暴露材令と塩化物イオンの浸透深さとの関係、かぶり厚さによる鉄筋の腐食状況の関係の実験データを得た。耐凍害性では、連行空気量と耐久性指数の関係、シリカフューム混和率と耐久性指数の関係の実験データを得た。

耐磨耗性では、スパイクタイヤを用いて実験を行い走行回数と磨り減り深さの関係の実験データを得

た。以上、実験の結果、

1 シリカフュームの混和量が増加するに伴い、シリカフュームコンクリートの圧縮ならびに引張強度は増大する。また、蒸気養生することにより強度発現は顕著に加速させることができる。

2 シリカフュームコンクリートの硬化収縮量は普通コンクリートよりも大きい。さらにシリカフュームの混和量ならびに比表面積に大きく依存することを明らかにした。

3 シリカフュームを混和することにより、コンクリートの水密性は著しく向上し、10年間の海洋暴露によると、塩化物イオンの浸透性は小さくなり、鉄筋腐食抑制効果は大きくなる。また、空気量を3%以上確保すれば耐凍害性を向上できることがわかった。

第3章では、前章の結果を得て、シリカフュームを混和したコンクリートの高機能化の一つとして、ポリマー含浸による強度改善について検討した。基材の養生条件と含浸圧の影響について、基材と含水率の影響について、含浸材の種類の影響について、重合までの放置時間と触媒の種類の影響について、特殊骨材による強度の改善について、それぞれ実験を行った。その結果、

1 ポリマーを十分に含浸するためには、基材の乾燥が必要不可欠であり、さらに無加圧条件でも、すなわち大気圧においても含浸でき、十分な強度が得られることを見出した。ポリマー含浸材の触媒には、AIBNを用いるのが最適である。

2 ポリマー含浸を行うことによって、圧縮及び引張強度を大幅に改善でき、弾性係数も増大させることができる。

3 骨材として、か焼ボーキサイトを使用すると、圧縮強度が  $250\text{N/mm}^2$ 、静弾性係数  $70\text{kN/mm}^2$  を越えるシリカフュームモルタルを製造することができる。

第4章では、前章で改善したポリマー含浸したシリカフュームコンクリートの硬化時の硬化収縮、硬化後の乾燥収縮などの寸法安定性について検討した。硬化収縮低減策として、水セメント比、シリカフューム混和率及び骨材の容積率、膨張材混和、膨張材置換率について、蒸気養生時期について実験を行った。乾燥収縮低減策として、オートクレーブ養生、樹脂コーティング、オートクレーブ養生温度、について実験を行った。硬化後の寸法安定性策について、長さ変化に及ぼす乾湿繰り返しの影響について実験を行った。その結果、

1 硬化収縮を抑制するためには、膨張材を混和するだけでは限度があり、膨張材の混和に加えて、シリ

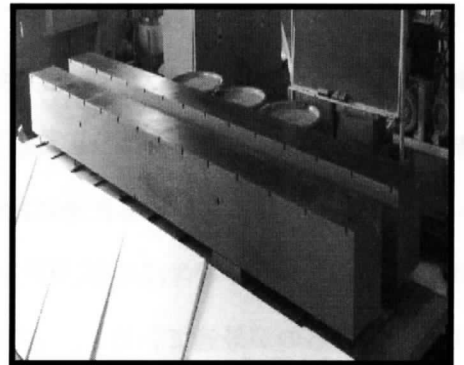
カフュームコンクリート（モルタル）の水和発熱が開始した時点で蒸気養生を行うことが有効である。

2 オートクレープ養生は、乾燥収縮を低減するに極めて効果的であり、蒸気養生だけの場合に比べ約 50% 程度小さくなる。

3 ポリマー含浸したモルタルは、強度及び弾性係数が大きく、乾湿の繰返しを受けても寸法変化はほとんどなく安定する。

第5章では、2章から4章までに得られた研究成果より、シリカフュームコンクリート（モルタル）は極めて高い強度が得られ、普通コンクリートと比較して透水性、クリープなどが小さく、型枠次第で自由形状が造れることが確認できた。この成果をどのようにして具現するかについて検討した。その結果、精密定盤、自動車用金型及び精密機械用台座について、実証実験を行った。

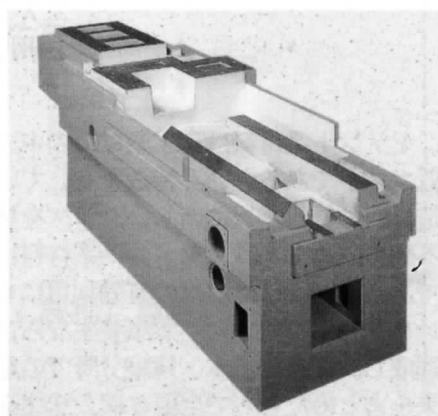
1 精密定盤は現状では、石、鋳物、セラミックス製の定盤がある。複雑な形状には不適であり、研究の成果であるシリカフュームモルタルの高強度、高弾性及び高耐摩耗性を応用して複雑形状への対応を図った。その結果、強度、弾性係数、寸法安定性では従来の石定盤には及ばないものの、コンクリートの特性を生かして形状が複雑な定盤や長尺の定盤などへの応用が期待できる。また、メタクリル酸メチルのポリマー含浸によって強度や寸法安定性が改善された。



2 自動車用金型は、試作用プレス型は亜鉛合金（ZAS）、量産用は鋳物で製作される。ZAS や鋳物の型は製作日数が長く、新車開発のスピードアップが求められた。研究の成果である高強度コンクリート及び耐摩耗性の高さを応用して、台数の少ない特殊車種への応用を試みた。その結果、量産用の鋳物型や従来の ZAS 型に比べると、プレスできる鋼板の板厚や最小 R は劣るものの、スタンプ枚数では ZAS 型を上回り、型費や製作日数を考慮すると、スピードの要求される試作用簡易プレス型として、また少量生産用プレス型として、シリカフュームコンクリートの優位性が認められた。



3 工作機械台座は通常、鋳物製のベッドが使用されるが鋳物のからしに長い期間がかかり、駆動部の振動で加工精度が上がらない欠点を持つ。研究の成果である振動減衰性及び高強度を応用して、寸法安定性加工物の寸法精度の向上と刃物の長寿命化にトライした。その結果、膨張材を添加して硬化収縮を低減することによって、鋳物とコンクリートの複合体の真直度変化を抑制することができた。芯なし研削盤による加工試験では、加工物寸法の精度が向上し、コンクリートベッドの優位性が確認された。



第6章結論では、2章から5章までを総括し、本研究の目的であるシリカフェームコンクリートを土木・建築以外の機械産業、自動車産業及び工作機械分野へ進出することが出来、工作機械分野では従来の鋳物以上の加工精度を得ることが出来た。



# 論文審査結果の要旨

セメント系材料は、工業材料の中でも最も低エネルギー消費型すなわち低環境負荷型の材料であり、かつ低コストであるという特徴を有している。そのため、セメント系材料の高強度化、高機能化技術の開発は構造材料の材料選択に新しいクラスを登場させるものと考えられる。シリカフュームは製鋼プロセスで発生する副生成物であり、セメント系材料に配合することにより微視組織的な緻密化により材料特性の向上に有益であると同時に、廃材の有効利用にも貢献することが期待される。本論文は、シリカフュームを配合したコンクリートを対象に、蒸気養生ならびにオートクレーブ養生などの加熱促進養生法により素材特性の向上を達成し、従来の土木・建築分野での応用を超えた新しい工学分野への展開に関する検討を行い、それらの結果をまとめたもので全編6章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の背景を述べている。

第2章では、蒸気養生により試作したシリカフュームコンクリートについて、強度などの機械的性質、寸法安定性ならびに耐久性に関する実験的評価を行い、普通コンクリートとの対比によりその特性を位置づけている。シリカフューム混和率が30%までは混和率の増加に伴って圧縮強度は増大すること、また蒸気養生は水中養生28日と同等の圧縮強度を発現することを示すことにより、蒸気養生が迅速にシリカフュームコンクリートの強度を向上させる方法として有効であることを明らかにしている。さらに、透水試験、海洋暴露試験、摩耗試験、凍結融解試験、加熱冷却試験を実施することにより、シリカフュームコンクリートの耐久性に関する基礎的特性についても系統的なデータベースが構築されている。

第3章では、蒸気養生によるシリカフュームコンクリートのさらなる高強度化を目的として、ポリマー含浸による強度改善に関する検討を行っている。シリカフュームコンクリートにおいては、基材を乾燥しさえすれば、圧力をかけることなくポリマー含浸できることを見出し、加えてこれにより大幅な強度改善ができることを示している。さらに、乾燥時間や重合までの時間の影響を明らかにすることにより、常圧でのポリマー含浸工法を提案している。この成果は、実用上の大きな意義を有するものである。

第4章では、試作したシリカフュームコンクリートの硬化収縮ならびに乾燥収縮などの寸法安定性について検討している。蒸気養生による硬化収縮は、水セメント比、シリカフュームの種類および混和率によって異なる。そこで、骨材容積率と硬化収縮の関係式を導くことにより、配合から蒸気養生後の硬化収縮量を推定できる方法をはじめて開発している。さらに、膨張材を混和して適切な時期に蒸気養生を開始することによって硬化収縮を抑制できることを見出している。また、オートクレーブ養生が乾燥収縮の低減に極めて有効であること、ならびにポリマー含浸することによって、湿度変動に対する寸法安定性を向上できることを見出している。この結果は、極めて独創的成果であるとともに実用上の波及効果も大きい。

第5章では、前章までに得られた知見に基づき、ポリマー含浸や混和材などによって高機能化したシリカフュームコンクリートを利用することにより、プレス型、精密定盤ならびに工作機械台座への展開・応用を図るための試作ならびに性能評価に関する検討を行い、いずれの適用においても従来材料に対して優位性があること、ならびに実用化の可能性があることを検証している。この成果は、実用上有益な知見を提供するものである。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、加熱促進養生法を用いてシリカフュームコンクリートの機械的特性や寸法安定性を格段に向上させ、従来にはなかったプレス型、精密定盤、工作機械台座へ適用することにはじめて成功したものであり、環境科学ならびに材料工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（環境科学）の学位論文として合格と認める。